



Conception et implémentation d'un réseau composé de quatre VCOs couplés oscillant à 6 GHz

Dorra Mellouli, David Cordeau, Jean-Marie Paillot, Hassene Mnif, Mourad Loulou

► To cite this version:

Dorra Mellouli, David Cordeau, Jean-Marie Paillot, Hassene Mnif, Mourad Loulou. Conception et implémentation d'un réseau composé de quatre VCOs couplés oscillant à 6 GHz. JNM 2013, May 2013, Paris, France. pp.J2-DA-P7. hal-00824582

HAL Id: hal-00824582

<https://hal.science/hal-00824582>

Submitted on 22 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conception et implémentation d'un réseau composé de quatre VCOs couplés oscillant à 6 GHz

Dorra Mellouli^{1,3}, David Cordeau², Jean-Marie Paillot², Hassene MNIF³, Mourad Loulou³

¹LIAS, Université de Poitiers, Poitiers, France

²Université de Poitiers & CNRS-XLIM, UMR 7252, Angoulême, France

³Laboratoire d'Electronique et des Technologies de l'Information,
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), Université de Sfax, Tunisie
dorra.mellouli@univ-poitiers.fr

Résumé

Ce papier décrit la conception et l'implémentation d'un réseau d'oscillateurs couplés totalement intégré en technologie BiCMOS SiGe 0,25 μ m. Ce réseau est constitué de quatre VCOs NMOS différentiels couplés au moyen d'une résistance. Pour une tension d'alimentation de 2.5V, une puissance consommée de 125 mW à une fréquence d'oscillation de 6 GHz, le réseau présente un bruit de phase de -127dBc/Hz à 1MHz de la porteuse et un déphasage qui varie de façon continue entre $-64^\circ < \phi < 64^\circ$ et $-116^\circ < \phi < 116^\circ$.

1. Introduction

Les réseaux d'oscillateurs couplés connaissent un intérêt croissant dans les applications militaires et commerciales. Ils permettent, entre autre, de commander un réseau d'antennes afin d'adapter son diagramme de rayonnement aux besoins de la communication en cours [1]. Dans ce cas, le diagramme de rayonnement est orienté dans une direction particulière en contrôlant la phase des signaux injectés sur chacun des éléments rayonnants. Ce déphasage peut être contrôlé via la commande des fréquences d'oscillation libre des deux oscillateurs élémentaires situés aux extrémités du réseau. Ainsi, en contrôlant les variations de ces fréquences d'oscillation libre correctement, il est possible d'obtenir la valeur du déphasage nécessaire qui assure l'orientation du diagramme de rayonnement selon l'angle de dépointage souhaité.

Malheureusement, il est montré dans [2] que la limite théorique du déphasage entre deux oscillateurs adjacents qui peut être obtenue dans ces conditions est seulement de $\pm 90^\circ$. Aussi, il semble intéressant d'étudier et d'analyser le comportement d'un réseau d'oscillateurs différentiels couplés puisque, dans ce cas, la limite théorique du déphasage est de 360° due au caractère différentiel du réseau. Ainsi, l'utilisation d'un tel réseau permet un contrôle continu du déphasage de 360° conduisant ainsi à une meilleure efficacité du réseau d'antennes commandé. De plus, les VCOs différentiels sont largement utilisés dans les circuits RF compte tenu de leurs performances en terme de bruit de phase relativement élevés ainsi que leur facilité d'intégration.

Dans ce contexte, ce travail de recherche consiste à étudier, proposer et valider une architecture de commande d'un réseau d'antennes basée sur le couplage de VCOs différentiels. Ainsi, ce réseau de VCOs couplés, pouvant osciller à une fréquence proche de 6 GHz pour des applications correspondant à la norme ETSI (European Telecommunications Standards Institute) pour l'ITS (Intelligent Transport System) et entièrement intégré, a été conçu, simulé et réalisé afin d'orienter le diagramme de rayonnement d'une antenne.

Dans une première partie, nous présenterons l'architecture du réseau de VCOs couplés étudiée. Par la suite, les résultats de simulations post layout seront présentés suivi par une conclusion.

2. Réseau de quatre VCOs couplés

L'étude de la synchronisation d'oscillateurs a commencé avec B. Van der Pol [3] qui a utilisé une méthode de "moyennage" pour obtenir des solutions approximatives pour des systèmes quasi-sinusoïdaux. Ensuite, R. Adler a donné à l'analyse d'oscillateurs micro-ondes une base plus physique en définissant l'équation dynamique de la phase d'un oscillateur sous l'influence d'un signal injecté [4]. Ceci a été repris par K. Kurokawa qui a dérivé les équations dynamiques tant pour l'amplitude que pour la phase [5], fournissant ainsi une compréhension pragmatique des oscillateurs micro-ondes couplés. Ces méthodes ont été généralisées par R. York pour inclure n'importe quel nombre d'oscillateurs couplés via un circuit de couplage, d'abord large-bande [6], puis bande étroite [7].

Indépendamment de la topologie, tout réseau d'oscillateurs doit satisfaire deux exigences clefs. Premièrement, les oscillateurs élémentaires doivent se synchroniser de façon stable dans le temps à une fréquence commune. Deuxièmement, ils doivent maintenir le déphasage entre eux à la valeur requise. Cela exige une compréhension solide de l'influence des divers paramètres du circuit, comme la force de couplage et l'écart entre les fréquences d'oscillation libre des oscillateurs élémentaires, sur les valeurs des phases des tensions aux bornes de chacun des oscillateurs.

De plus, une analyse du bruit de phase des oscillateurs couplés a été effectuée dans [8], [9] et [10]. Cette analyse montre que le bruit de phase total d'un réseau de VCOs couplés est significativement réduit par rapport à celui d'un seul VCO libre, à condition que le réseau de couplage soit conçu de manière appropriée. En effet, le bruit de phase total de N oscillateurs différentiels couplés est réduit de $1/N$ (i.e. $10 \cdot \log(N)$), indépendamment de la valeur du déphasage entre les signaux de sortie des oscillateurs constituant le réseau, de sorte que:

$$pn(dB)_{total} = -10 \cdot \log(N) + pn(dB)_{VCOseul} \quad (1)$$

Où $pn(dB)_{total}$ est le bruit de phase total du réseau de VCOs couplés, $pn(dB)_{VCOseul}$ est le bruit de phase d'un VCO seul et N représente le nombre de VCOs constituant le réseau.

Le réseau conçu est constitué de quatre VCOs NMOS différentiels couplés au moyen d'une résistance, comme indiqué sur la figure 1. Chaque VCO différentiel constituant le réseau est basé sur l'architecture à paire croisée NMOS comme illustré sur la figure 2. Dans cette architecture, les transistors forment la résistance négative permettant de compenser les pertes associées au circuit résonnant, formé d'une inductance différentielle et de deux diodes varicap montées en cathode commune. La source de courant est réalisée à l'aide d'un miroir de courant NMOS classique et permet de fournir le courant de polarisation (I_{bias}). Les VCOs sont considérés identiques, à l'exception de leurs fréquences d'oscillation libre. Ainsi, les fréquences de ces quatre VCOs peuvent être contrôlées à l'aide des tensions de commande V_{tune1} , V_{tune} et V_{tune4} .

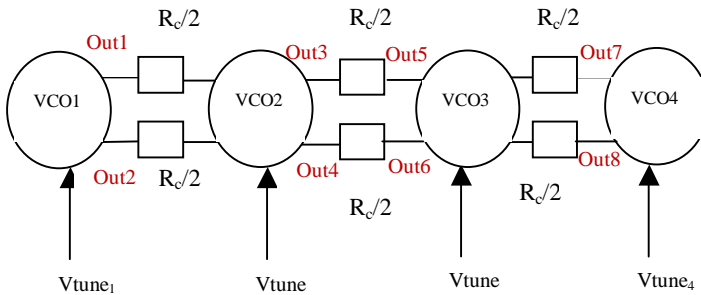


Figure 1. Schéma du réseau constitué de quatre VCOs couplés.

En outre, selon York et al. [2], le déphasage obtenu est constant et indépendant du nombre d'oscillateurs constituant le réseau. Il peut de plus être facilement contrôlé par un léger désaccord des fréquences d'oscillation libre des oscillateurs situés aux deux extrémités du réseau (VCO1 et VCO4). En conséquence, la fréquence de synchronisation souhaitée est imposée aux VCO 2 et 3 par l'intermédiaire de la tension de commande V_{tune} alors que les tensions de commande des deux VCOs situés aux extrémités (V_{tune1} et V_{tune4}) peut être ajustée de manière à obtenir le déphasage désiré.

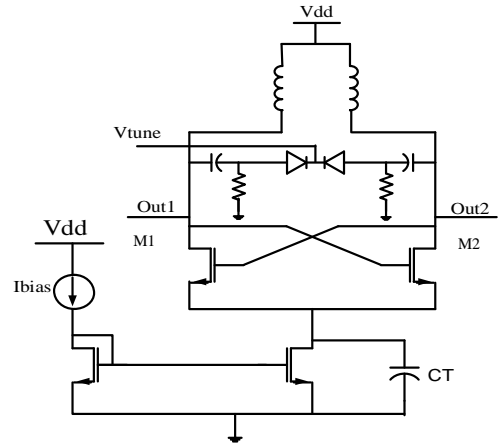


Figure 2. Structure du VCO NMOS différentiel

3. Implémentation et résultats de simulations post layout

La technologie NXP Qubic 4X BiCMOS SiGe 0,25 μm a été utilisée pour implémenter le réseau d'oscillateurs couplés. Le dessin des masques réalisé sous le logiciel « Cadence » est donné sur la figure 3. Le circuit a une superficie de 4 mm^2 (pads inclus).

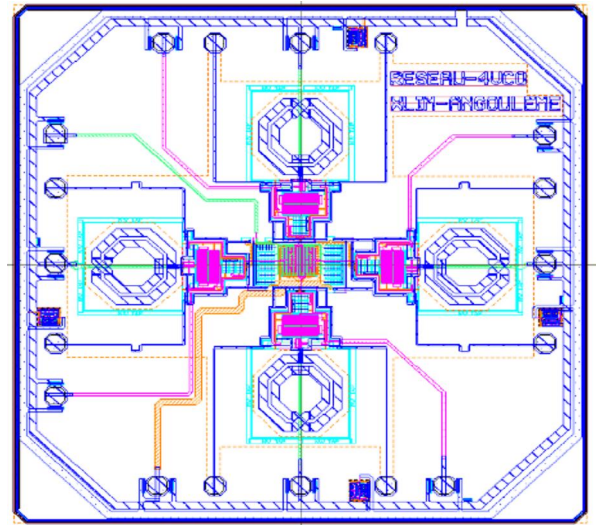


Figure 3. Dessin des masques du réseau constitué de quatre VCOs couplés.

Les quatre VCO différentiels sont couplés au moyen d'une résistance de valeur 400Ω afin de maximiser la plage de verrouillage ainsi que la variation en phase. Les simulations post-layout effectuées avec Spectre RF montrent que la valeur minimale du déphasage entre les signaux issus de deux VCO adjacents est égale à $0,85^\circ$ et est obtenue pour les fréquences d'oscillation libre suivantes : $f_{01} = f_{02} = f_{03} = f_{04} = 6,15 \text{ GHz}$. Les signaux de sorties du réseau sont montrés sur la figure 4 (sur charge 50Ω). Dans ce cas, les quatre VCOs sont synchronisés à la fréquence 6.15 GHz .

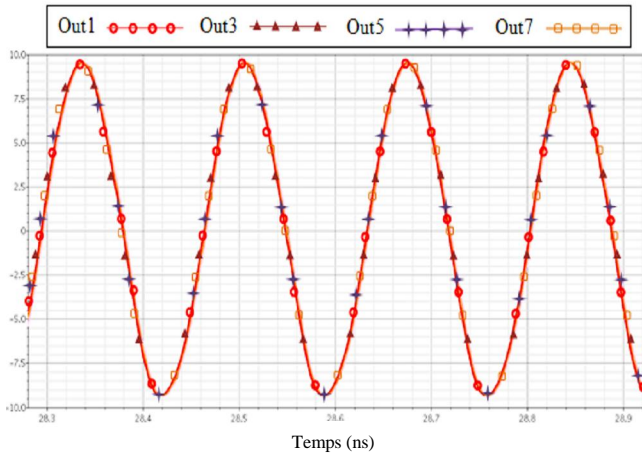


Figure 4. Formes d'ondes simulées à la sortie des quatre VCOs lorsque $f_{01} = f_{02} = f_{03} = f_{04} = 6.15$ GHz avec $\phi = 0.85^\circ$.

Maintenant, afin de montrer l'aptitude et la capacité du système à atteindre le déphasage souhaité, les fréquences libres des deux VCOs situés aux extrémités du réseau (VCO1 et VCO4) sont modifiées de telle sorte que la fréquence de synchronisation reste la même. Un exemple des formes d'ondes obtenues à la sortie des VCOs 1, 2, 3 et 4 est illustré sur la figure 5. Dans cet exemple, le déphasage simulé entre les VCOs 1 et 2 est de $28,24^\circ$; 29° entre les VCOs 2 et 3 et celui mesuré entre les VCOs 3 et 4 est de $28,8^\circ$. Notons que ce déphasage est obtenu pour $f_{01} = 6.22$ GHz, $f_{02} = f_{03} = 6,15$ GHz et $f_{04} = 6,08$ GHz. De plus, la valeur maximale du déphasage est obtenue pour $f_{01} = 6.27$ GHz, $f_{02} = f_{03} = 6,15$ GHz et $f_{04} = 6,03$ GHz et est égale à 64° . Au-delà de ces valeurs de fréquences d'oscillation libre, les VCOs ne peuvent plus se synchroniser.

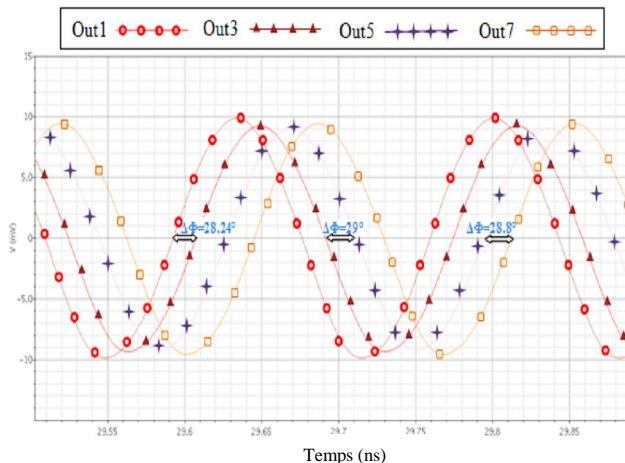


Figure 5. Formes d'ondes simulées à la sortie des quatre VCOs lorsque $f_{01} = 6.22$ GHz ; $f_{02} = f_{03} = 6.15$ GHz et $f_{04} = 6.08$ GHz avec $\phi = 29^\circ$.

De manière à souligner l'intérêt d'une telle architecture pour la commande d'un réseau d'antennes, la figure 6 montre l'évolution du déphasage obtenu entre les VCOs 2 et 3 en fonction de $f_0 = f_{01} - f_{04}$. La fréquence de synchronisation de l'ensemble est de 6.15 GHz.

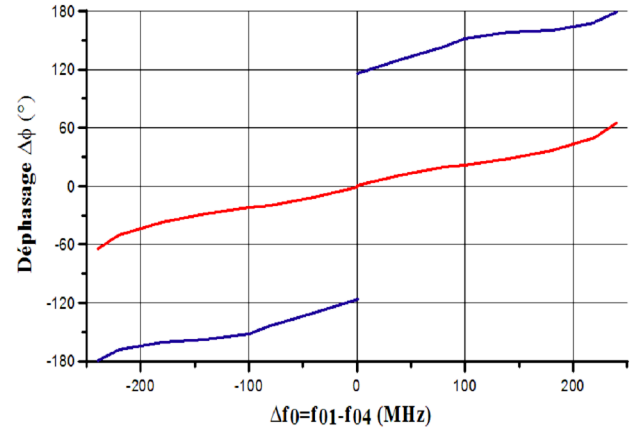


Figure 6. Déphasage en fonction de l'écart f_0 .

Comme montré sur cette figure, un écart de fréquence allant de -240 à $+240$ MHz a permis d'obtenir une plage de déphasage comprise entre -64° et $+64^\circ$. Néanmoins, avec ce système, nous pouvons contrôler en plus la zone $180^\circ \pm 64^\circ$ ce qui n'est pas possible sans l'utilisation des VCOs différentiels.

La différence de phase obtenue peut être nécessaire pour contrôler électroniquement la direction de rayonnement d'une antenne réseau. Pour cela, il est essentiel de maîtriser les phases des signaux appliqués sur chaque antenne élémentaire. Pour un réseau linéaire, un déphasage ϕ entre les sources commandant les antennes élémentaires d'un réseau entraîne une variation de l'angle de dépointage de l'antenne réseau dans la direction θ_0 désirée, tel que :

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\phi\right) \quad (2)$$

où d est la distance séparant deux antennes et λ est la longueur d'onde.

Ainsi, la Figure 7 montre le déphasage qu'il faut imposer entre les sources adjacentes commandant les antennes élémentaires du réseau afin d'orienter son lobe principal dans une certaine direction θ_0 désirée. Cette

figure a été générée pour un pas de réseau $d = \frac{\lambda}{2}$, cette

distance étant le compromis optimal entre la directivité et le niveau des lobes secondaires mais c'est également la distance qui permet de réduire au maximum les effets de couplage entre antennes. Il est à noter qu'un déphasage nul entraîne une direction de rayonnement $\theta_0 = 0$. Cette direction est la direction perpendiculaire au plan formé par les antennes élémentaires, autrement dit, un réseau placé selon l'axe des x rayonne selon l'axe z si le déphasage est nul entre ses éléments. En outre, l'angle de rayonnement varie entre $\pm 90^\circ$ pour une différence de phase variant de -180° à $+180^\circ$. Avec le circuit proposé, la limite du déphasage obtenue est de 64° , mais grâce au caractère différentiel de notre réseau, la zone $180^\circ \pm 64^\circ$ peut également être contrôlée.

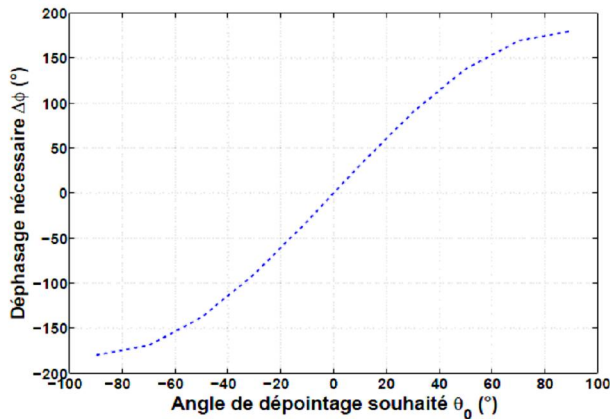


Figure 7. Déphasage en fonction de l'angle de pointage θ_0 .

Ainsi, ces résultats montrent qu'il est possible d'ajuster, avec une précision relativement élevée, les fréquences d'oscillation libre des VCOs nécessaires pour atteindre le déphasage souhaité permettant ainsi d'orienter le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes dans la direction voulue.

La Figure 8 illustre la variation du bruit de phase en fonction de la fréquence d'offset pour le réseau constitué de quatre VCOs couplés pour les fréquences d'oscillation libre $f_{01} = 6.13$ GHz ; $f_{02} = f_{03} = 6.15$ GHz et $f_{04} = 6.17$ GHz. Le réseau d'oscillateurs couplés atteint un bruit de phase, dans le pire des cas, de -127 dBc/Hz à 1 MHz de la porteuse.

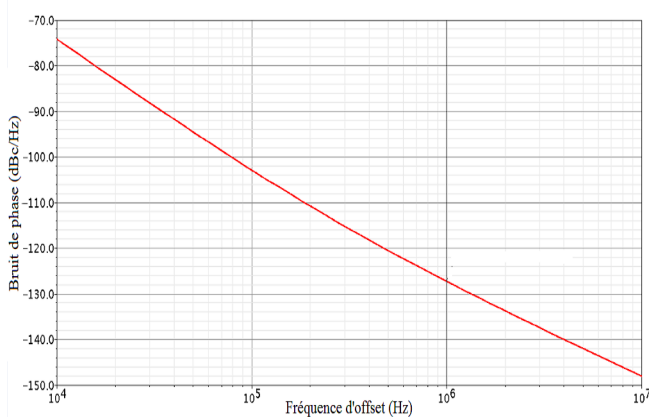


Figure 8. Bruit de phase simulé du réseau de VCO couplés pour $\theta_0 = 29^\circ$.

Pour vérifier la théorie élaborée dans [8]-[10], un VCO différentiel a été simulé et le bruit de phase obtenu vaut -121.8 dBc/Hz à 1 MHz de la porteuse et pour $V_{tune} = 0.9$ V. Dans les mêmes conditions, c'est-à-dire pour $V_{tune1} = V_{tune2} = V_{tune3} = V_{tune4} = 0.9$ V, le réseau d'oscillateurs couplés présente un bruit de phase de -127.3 dBc/Hz. Par conséquent, les résultats de simulations post-layout montrent une bonne concordance avec la théorie puisque le bruit de phase total du réseau composé de quatre VCOs couplés a diminué de $10 \cdot \log(4)$ (= 6 dB) par rapport à un VCO différentiel seul.

4. Conclusion

Ce papier décrit la conception et l'implémentation d'un réseau constitué de quatre VCOs différentiels couplés au moyen d'une résistance, oscillant à une fréquence de 6 GHz et entièrement intégré en technologie BICMOS SiGe 0.25 μ m. Ce réseau d'oscillateurs couplés présente, pour une tension d'alimentation de 2.5 V et une puissance consommée de 125 mW, un bruit de phase de -127dBc/Hz à 1MHz de la porteuse et un déphasage qui varie de façon continue entre $-64^\circ < \phi < 64^\circ$ et $-116^\circ < \phi < 116^\circ$ nécessaire pour commander un réseau d'antennes.

5. Bibliographie

- [1] S. Toon, A. Banai, F. Farzaneh, « *Evaluation of beam steering in circular planar array of coupled microwave oscillators* », International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 21, n°4, pp. 383-391, July 2011.
- [2] R. A. York, « *Nonlinear analysis of phase relationships in quasi-optical oscillator arrays* », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 41, n°10, pp. 1799-1809, Oct 1993.
- [3] B. Van der Pol, « *The nonlinear theory of electric oscillations* », Proceedings of the IRE, vol. 22, No. 9, pp. 1051-1086, September 1934.
- [4] R. Adler, « *A study of locking phenomena in oscillators* », Proceedings of the IRE, vol. 34, No. 6, pp. 351-357, June 1946.
- [5] K. Kurokawa, « *Injection locking of microwave solid-state oscillators* », Proceedings of the IEEE, vol. 61, No. 10, pp. 1386-1410, October 1973.
- [6] R. York and P. Liao, « *Oscillator array dynamics with broadband N-port coupling networks* », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 42, No. 11, pp. 2040-2045, November 1994.
- [7] J. Lynch and R. York, « *Synchronization of oscillators coupled through narrow-band networks* », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 49, No. 2, pp. 237-249, February 2001.
- [8] H. C. Chang, X. Cao, M. J. Vaughan, U. K. Mishra and R. A. York, « *Phase Noise in Externally Injection-Locked Oscillator Arrays* », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 45, No. 11, pp. 2035-2042, November 1997.
- [9] H. C. Chang, X. Cao, U. K. Mishra and R. A. York, « *Phase Noise in Coupled Oscillators* », IEEE Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S Conference, Vol.2, pp. 1061-1064, June 1997.
- [10] H. C. Chang, X. Cao, U. K. Mishra and R. A. York, « *Phase Noise in Coupled Oscillators: Theory and Experiment* », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 45, No. 5, pp. 604-615, May 1997.